

## 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동

이진섭<sup>1)</sup> · 김상식<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>(주)연우건축구조기술사사무소 <sup>2)</sup>인하대학교 건축공학과

(2001년 6월 25일 원고접수, 2001년 10월 18일 심사완료)

## Shear Behavior of Reinforced Concrete Deep Beams with Web Openings

Jin-Seop Lee<sup>1)</sup>, and Sang-Sik Kim<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup> Yunwoo Structural Engineers, Co., Ltd, Seoul, 135-080, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 402-042, Korea

(Received on June 25, 2001, Revised on October 18, 2001)

### ABSTRACT

In building construction, openings of the story-height deep beams are usually required for accessibility and service lines such as air conditioning ducts, drain pipes and electric units. It is known that the main parameters affecting the load bearing capacity of deep beams with web openings are size, shape, location and reinforcements of openings. However, there have been no pertinent theories and national design codes for predicting ultimate shear strength of reinforced concrete deep beams with web openings.

In this study, the shear behavior of simply supported reinforced concrete deep beams with web openings subject to concentrated loads has been scrutinized experimentally. A total of 34 specimens, the geometry of openings, its reinforcements and shear span to depth ratio, being taken as the experimental variables, has been cast and tested in the laboratory. The effects of these structural parameters on the shear strength and crack initiation and propagation have been carefully checked and analyzed.

From the tests, it has been observed that the failures of all specimens were due to shear mechanism and the ultimate strength of specimens varies according to the location of openings, by which the formation of compression struts between the loading points and supports are deterred. All of the test results of specimens have been compared with the formulas proposed by previous researchers. The results were closely coincident with the formulas given by Ray and Kong's equation except for some X series specimens having a larger dimension of openings beyond the geometric limits of proposed equations.

**Keywords :** deep beams, web openings, shear-span to depth ratio, web reinforcements, compression struts

### 1. 서 론

철근콘크리트 건물에서 두 가지 이상의 구조 시스템을 혼용하거나 기둥 열이 바뀌어 연직 하중 전달이 불연속적인 경우에는, 상부 하중을 인접한 하부 층에 효과적으로 전달하기 위하여 층 높이의 하중전달 보나 기초 벽보, 전단벽과 같은 깊은 보를 설치하게 된다. 이러한 깊은 보의 하중 전달 경로가 일반적인 보와 다르며, 콘크리트 구조설계기준<sup>1)</sup>에서는 지점 사이의 순경간이 유효깊이의 5 배 이하이고 하중이 윗면이나 압축연단에 작용하며 하중점과 지지점 사이의 경사진 압축대에 의하여 힘이 전달되는 부재로 정의하여, 부재의 전단설계시 변형률의 비선형 분포

를 고려하도록 규정하고 있다.

깊은 보의 실제 시공에서는 창호, 배관, 설비 등의 건축적 요구에 의해 힘의 주요 전달 경로인 주 압축대에 개구부를 설치하게 되는 경우가 많다. 이러한 경우 깊은 보에 설치된 개구부에 의하여 힘의 전달 경로가 훼손되어 깊은 보의 응력 분포 및 구조적 거동은 더욱 복잡한 양상을 띠게 되며, 극한 강도 또한 감소하게 된다. 현재까지의 연구 결과, 복부에 개구부를 갖는 깊은 보의 하중 지지 성능은 전단경간비, 콘크리트 강도 및 복부 보강근 등 깊은 보에 영향을 주는 일반적인 요소 외에도 개구부의 크기, 위치 및 형태 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다<sup>2,3,4)</sup>.

하지만 아직까지도 개구부를 갖는 깊은 보에 대한 정확한 이론 및 규준이 정립되지 않고 있으며, 몇몇 연구자에 의한 실험식만이 제시되고 있을 뿐이다<sup>3,4)</sup>. 따라서 복부에 개구부를 갖는 철근콘크리트 깊은 보를 대상으로, 개구부

\* Corresponding author

Tel : 032-860-7586 Fax : 032-866-4624

E-mail : hanjib@inha.ac.kr

의 위치 및 크기, 복부의 보강 형태 등에 따른 전단 거동을 폭넓게 고찰하고 개구부의 보강근이 전단강도에 미치는 효과 등을 실험을 통하여 규명하는 것이 필요하다.

이러한 관점에서 이 연구에서는 사각형의 개구부를 갖는 양단 단순지지된 철근콘크리트 깊은 보를 대상으로 개구부의 위치, 크기, 개구부 보강 형태를 변수로 하여 이들 구조 변수가 깊은 보의 최대 전단내력, 균열 발생 및 진전, 파괴 형태 등에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 통해 개구부 보강근의 보강 효율성을 검토하고 기존의 제안식과 비교·분석하여, 개구부를 갖는 깊은 보의 설계에 필요한 기초 자료를 제시하는 것을 그 목적으로 하고 있다.

## 2. 시험체 및 실험장치

### 2.1 시험체 제작

모든 시험체는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 그 크기 가로 폭 10 cm, 깊이 50 cm이고 지점 중심거리는 120 cm로 일정하다. 콘크리트의 설계 압축강도는 250 kgf/cm<sup>2</sup>로 하였고, D10 이상의 보강근은 SD 40의 이형철근, 그 이하의 복부 보강근은 SR 30의 원형철근이 사용되었다. 주인장철근은 SD40 재질의 2-D19로서 주인장철근비는 0.0125이며, 90° 갈고리 철근으로 정착길이를 확보하였다. 실험에 사용된 시험체는 모두 34 개이며, 시험체는 기본적으로 개구부의 가로·세로 크기에 따라 다음과 같이 나뉘어진다.

X 계열 : 20 cm×20 cm  
Y 계열 : 30 cm×20 cm  
Z 계열 : 10 cm×10 cm

#### 2.1.1 X, Y 계열 시험체

X 계열과 Y 계열 시험체는 모두 22 개가 제작되었으며 각 시험체의 제원은 Table 1 및 Fig. 1의 a) ~ c)에서 보

이는 바와 같으며, X, Y 계열 시험체의 실험 변수는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 개구부의 위치, 형상
  - 양단 2 개 20 cm×20 cm : X
  - 중앙 1 개 30 cm×20 cm : Y
- 2) 전단경간비( a/d )
  - 0.43 : A, 0.87 : B, 1.30 : C
- 3) 개구부 보강 ; 무보강 : 0
  - 개구부 4 면 보강 : 1
  - 개구부 주변 복부 보강 : 2
  - 개구부 모서리 보강 : 3
  - 복부의 대각근 보강 : D

시험체 기호 표시에서 첫 번째 문자는 개구부의 크기를 나타내고, 두 번째 문자 A, B, C는 전단경간비에 대한 것으로서 전단경간비가 각각 0.43, 0.87, 1.30 임을 지칭하며, 마지막 숫자는 개구부의 보강 형태를 나타낸다.

#### 2.1.2 Z 계열 시험체

Z 계열 시험체는 모두 12 개가 제작되었으며, Fig. 1의 d) ~ f)와 같이 시험체의 중앙을 중심으로 한 쪽에는 개구부를 배치하고 다른 한 쪽에는 개구부가 없도록 제작하였고, 시험체의 전단경간비는 0.87로 일정하게 유지하였다. 복부의 기본 보강은  $\phi 6$  원형철근을 사용하였으며, 개구부가 없는 시험체<sup>2)</sup>를 기준으로 수직철근비는 0.0057, 수평철근비는 0.0054로 하였다. 각 시험체의 상세한 제원은 Table 2에 나타나 있으며, 시험체의 변수는 다음과 같다.

- 1) 개구부의 크기 : 10 cm×10 cm : Z
- 2) 개구부의 위치
  - 전단 구역의 중앙 : M
  - 전단 구역의 3 사분면 (지점부) : N

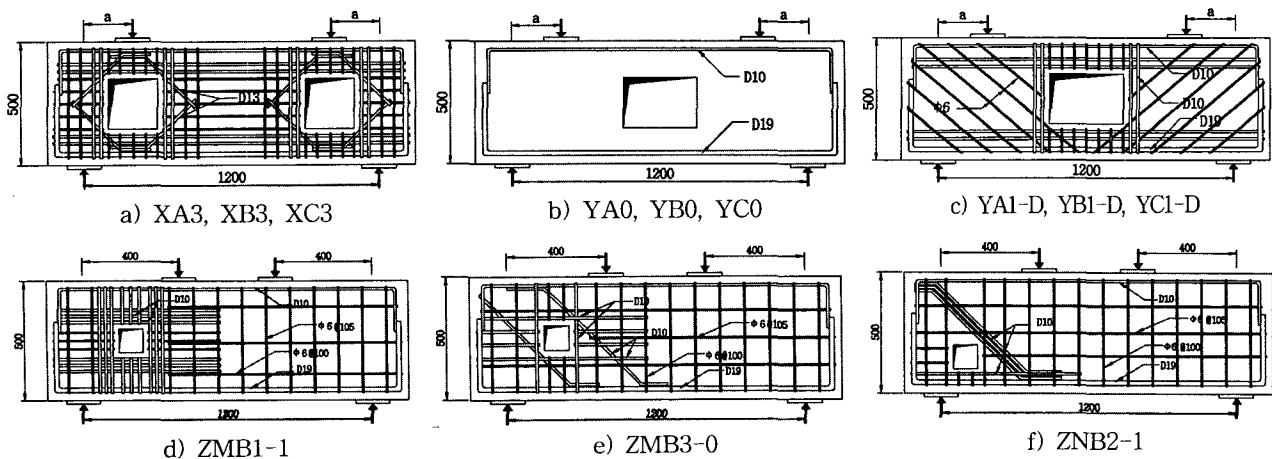


Fig. 1 Detail of the specimens

3) 개구부의 보강 형태

- 개구부 주변 직선 철근 보강 : 1
- 개구부 모서리 대각 철근 보강 : 2
- 개구부의 직선 및 대각근 조합 보강 : 3

시험체 기호 표시에서 ZMB2-0은 개구부가 10 cm × 10 cm 크기에 전단구역의 중앙에 위치하며, 개구부 모서리에 복배근으로 1-D10 철근이 대각선으로 배근된 시험체를 나타낸다.

2.1.3 사용재료 및 시험체 제작

시험체 제작에는 KSL 5201의 규격에 맞는 시멘트와, 최대 지름 20 mm 이하의 굵은 골재가 사용되었다. 콘크리트의 설계 압축강도는 250 kgf/cm<sup>2</sup>을 기준으로 Table 3과 같이 배합하여 타설하였으며, 28일 이상 양생한 후 압축강도를 측정하였다. 평균 압축강도는 타설 시기 및 양생 일수에 따라 다소 차이가 있으며, X, Y 계열 시험체의 경우는 312 kgf/cm<sup>2</sup>, Z 계열 시험체의 경우는 1차 250 kgf/cm<sup>2</sup>, 2차 288 kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

Table 1 Specifications of X,Y series specimens

Specimens	Dimension of web openings (mm)	Location of web openings	Shear -span ratio (a/d)	Detail of reinforcements			
				Reinforcements on each face of openings	Distributed reinforcements on each face of openings	Diagonal reinforcements on each corner of openings	Diagonal reinforcements of web
XA0 XA1 XA2 XA3	200 × 200	1/6, 5l/6	0.43	- 1-D10 1-D10 1-D10	- - φ6@50 φ6@50	- - - 1-D13	- - - -
XB0 XB1 XB2 XB3	200 × 200	1/6, 5l/6	0.87	- 1-D10 1-D10 1-D10	- - φ6@50 φ6@50	- - - 1-D13	- - - -
XC0 XC1 XC2 XC3	200 × 200	1/6, 5l/6	1.30	- 1-D10 1-D10 1-D10	- - φ6@50 φ6@50	- - - 1-D13	- - - -
YA0 YA1 YA1-D	200 × 300	Center of specimen	0.43	- 1-D10 1-D10	- - -	- - -	- - φ6@100
YB0 YB1 YB1-D	200 × 300	Center of specimen	0.87	- 1-D10 1-D10	- - -	- - -	- - φ6@100
YC0 YC1 YC1-D	200 × 300	Center of specimen	1.30	- 1-D10 1-D10	- - -	- - -	- - φ6@100
YC0-1	200× 300	5 cm below the specimen center	1.30	-	-	-	-

Table 2 Specifications of Z series specimens

Specimens	Dimension of web openings (mm)	Location of web openings	Shear -span ratio (a/d)	Detail of reinforcements			
				Reinforcements on each face of openings	Distributed reinforcements on each face of openings	Diagonal reinforcements on each corner of openings	Reinforcements ratio of web
ZMB0 ZMB1-0 ZMB1-1 ZMB2-0 ZMB2-1 ZMB3-0	100×100	Center of shear area	0.87	- 1-D10 3-D10 - 1-D10	- 3-φ6 3-D10 - 3-φ6	- - - 1-D10 2-D10 1-D10	Vertical 0.0057, Horizontal 0.0054
ZNB0 ZNB1-0 ZNB1-1 ZNB2-0 ZNB2-1 ZNB3-0	100×100	Near of the support point in shear area	0.87	- 1-D10 4-D10 - 1-D10	- 3-φ6 3-D10 - 3-φ6	- - - 1-D10 4-D10 1-D10	Vertical 0.0057, Horizontal 0.0054

## 2.2 실험 장치 및 실험 방법

시험체의 가력에는 Fig. 2와 같이 200 톤 용량의 대형 구조물시험기가 사용되었으며, 상부에 2 점 집중하중 가력을 위하여 복부가 보강된 H-300×300 형강을 설치하였고, 시험체의 지압파괴를 막기 위하여 길이 14 cm, 넓이 10 cm의 헌지로 된 지지판을 설치하였다. 시험체의 보강철근에는 와이어 스트레인지지를 부착하였고, 시험체의 중앙부에 3 개, 지지점 사이의 1/4 지점에 각각 2 개씩의 자동변위계를 설치하였다. 시험체에 가해지는 하중은 대형구조물 시험기에 장착되어 있는 로드셀을 이용하여 측정하였으며, 1 분당 약 0.5~1.0 톤의 속도로 단조 가력하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 균열 및 파괴 양상

X, Y 계열 및 Z 계열 시험체의 균열양상은 Fig. 3에 나타나 있으며, 각 계열 및 시험체 별 파괴 양상은 다음과 같다.

#### 3.1.1 X 및 Y 계열 시험체

주압축하중경로가 개구부를 통과하는 X 계열 시험체의 파괴는 대부분 하중점 또는 반력점에서 먼 쪽의 개구부 모서리를 잇는 선을 따라 이루어졌다. 개구부 주변 보강량

이 증가할수록 비교적 짧은 균열이 여러 개소에 분산되어 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며 시험체 하부의 휨 균열은 찾아보기 어려웠다. 또한, 여러 시험체에서 개구부 상 하단에 초기 경사균열이 발생하여 진전하다가 거의 파괴하중에 이르러서 새로운 경사균열이 발생하고, 이 균열에 의해 파괴되는 양상을 보였는데, 이러한 현상은 보강근 등에 의해서 하중이 지지되다가 응력의 재분배가 일어나면서 가장 취약한 부분으로 파괴가 일어난 것으로 추측된다.

주압축하중경로가 개구부를 통과하지 않는 Y 계열 시험체는 개구부가 주 압축대의 압축력 흐름을 일부 방해하는 YC 계열 시험체를 제외하고는 개구부가 없는 깊은 보의 균열 양상과 유사하다. 또한 복부에 등간격 대각보강근이 배치된 시험체는 다른 시험체에 비해 하중 지지 성능이 높을 뿐 아니라 균열폭도 작고 여러 개소로 분산되게 발생하고 있는 것을 관찰할 수 있었다.

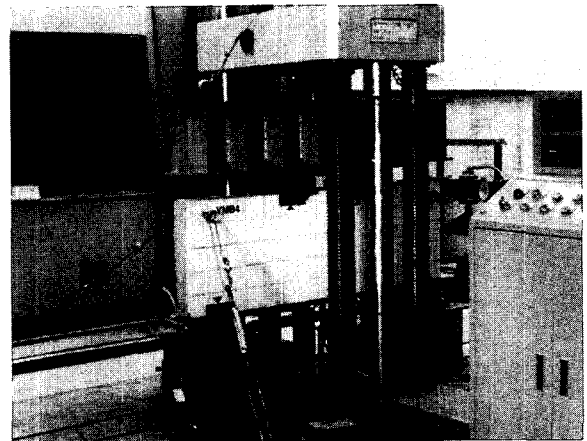


Fig. 2 Set-up for test

Table 3 Mixture proportions of concrete

Design strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Water-cement ratio (%)	Unit volume weight (kgf/m <sup>3</sup> )			
		Cement	Water	Sand	Aggregate
250	51	343	176	919	839
250	53	352	187	855	868

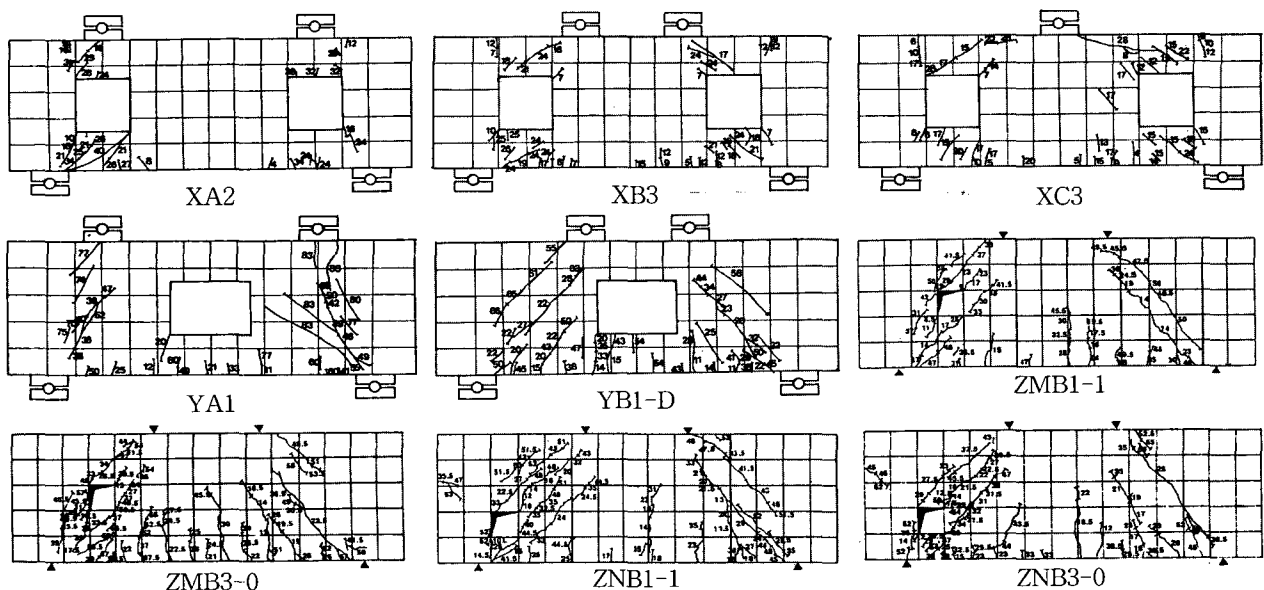


Fig. 3 Crack patterns and failure modes

### 3.1.2 Z 계열 시험체

Z 계열의 모든 시험체는 전단경간비가 0.87이며, 시험체의 한 쪽에만 10 cm×10 cm 크기의 개구부를 갖는 것으로서, 가력점과 반력점 사이의 주압축하중경로를 잇는 선이 개구부에 의해 방해받는 시험체이다. 대다수 Z 계열 시험체의 초기 균열은 개구부 모서리에서의 미세한 균열로 나타났으나, 개구부의 보강이 비교적 많은 시험체에서는 최대 휨 모멘트 구간에서의 휨 균열로 나타났다. 개구부 보강이 상대적으로 많은 ZMB2-1, ZNB2-1 시험체 및 ZMB3-0, ZNB3-0 시험체의 파괴는 개구부가 없는 면에서 발생하였으나, 나머지 시험체는 개구부 주변의 과도한 균열 및 압괴에 의해 파괴되었다.

개구부가 전단 구역의 중앙에 위치한 ZM 시험체의 초기 균열은 개구부의 모서리 중 하단부에서 먼저 발생하였으며, 이후 모서리의 상 하단으로 진전되었다. 균열의 진전은 개구부의 상부보다는 하단 쪽에서의 진전이 더 빠르게 파급되었고, 개구부가 있는 쪽의 균열은 없는 쪽의 균열에 비해 비교적 많은 수의 균열이 발생하여 개구부 주변의 힘의 흐름이 좀더 복잡한 양상을 띄는 것으로 나타났다.

개구부가 전단 구역의 3사분면인 지점부에 위치한 ZN 시험체의 초기 균열은 개구부의 모서리에서 인장 균열의 형태로 발생하였으며, 이후 상부 모서리에서 가력점 쪽으로 진전되며 파괴되었다.

## 3.2 하중 - 변위 관계

시험체의 균열 및 파괴하중과 변위와의 관계는 Table 4 및 Fig. 4에 보이는 바와 같으며, 각 계열 및 시험체 별 하중-변위는 다음과 같다.

### 3.2.1 X 계열과 Y 계열 시험체

X 계열 시험체의 하중-변위 곡선에서 개구부의 보강량이 많아질수록 초기 강성과 최대 하중이 증가하고 변형에너지 흡수율이 커져 연성적인 파괴 거동을 나타내었다. 전단경간비가 0.43인 XA 계열 시험체에서는 개구부 보강근 중 대각보강근의 효율이 다른 보강근에 비해 월등히 높게 나타났지만, 전단경간비가 0.87, 1.30인 XB 계열과 XC 계열에서는 복부의 등간격 보강 효과가 크게 나타났다. Y 계열 시험체의 경우, 가력점 하부의 개구부 상단이 국부적으로 파괴된 YC 계열 시험체를 제외한 모든 시험체가 개구부가 없는 시험체의 파괴 거동과 유사한 형태를 나타내었다. 또한 복부가 대각방향 철근으로 보강된 시험체가 가장 큰 하중지지능력을 보이고 있는데 그 중에서도 주 압축대의 각도가 45° 인 YB 시험체에서 대각보강근의 효율이 가장 뚜렷하게 나타났다.

### 3.2.2 Z 계열 시험체

개구부가 보강되지 않은 ZMB0, ZNB0 시험체는 개구부가 보강된 시험체에 비해 최대 하중 및 초기 강성이 현저히 감소하며, 개구부가 보강된 시험체는 보강근 량의 증가에 따른 강성 변화는 거의 없으나 최대 하중은 일정하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 모든 시험체에서 초기 경사균열이 발생한 이후 미소하게 시험체의 강성이 감소하며, 최대하중의 약 80 퍼센트에서 가력점에서의 새로운 경사균열이 발생하기 전까지 거의 초기의 강성을 유지하다가, 가력점의 새로운 경사균열 이후 비선형 거동을 보이고 있다.

## 3.3 하중 - 변형률 관계

### 3.3.1 X, Y 계열 시험체

Fig. 5에서와 같이 X 계열 시험체에서 주인장철근의 변형률은 개구부 하부에 배치한 수평 보강근의 변형률과 유사하거나 작은 값을 갖는다. 전단경간비가 0.43이며, 개구

Table 4 Cracking and failure load of test specimens

Specimens	Initial crack		Diagonal crack		Failure	
	Load (tonf)	Disp. (mm)	Load (tonf)	Disp. (mm)	Load (tonf)	Disp. (mm)
XA0	4.5	0.18	19.0	0.84	28.7	1.57
XA1	4.5	0.07	16.5	0.41	36.2	1.48
XA2	4.5	0.22	16.5	0.57	40.5	2.39
XA3	4.5	0.08	22.5	0.56	53.9	3.68
XB0	2.0	0.09	9.5	1.24	13.3	2.98
XB1	4.0	0.18	12.0	0.84	17.4	2.10
XB2	4.0	0.19	12.0	0.83	28.0	3.95
XB3	5.5	0.22	17.5	0.94	32.8	3.12
XC0	4.0	0.27	5.0	0.50	10.4	3.30
XC1	4.5	0.26	9.0	0.59	13.9	1.38
XC2	5.0	0.31	14.0	1.46	24.3	4.47
XC3	4.0	0.20	15.0	1.09	29.2	3.56
YA0	7.0	0.09	24.0	0.41	69.9	1.96
YA1	11.5	0.28	30.5	0.62	83.2	2.03
YA1-D	13.0	0.13	30.5	0.39	85.8	1.67
YB0	6.5	0.12	18.0	0.52	54.3	1.99
YB1	6.5	0.02	18.0	0.41	56.2	2.40
YB1-D	11.5	0.23	20.0	0.47	69.6	3.15
YC0	5.0	0.14	12.5	0.44	24.1	1.21
YC0-1	7.0	0.08	11.0	0.18	29.6	1.23
YC1	6.5	0.14	13.5	0.32	20.2	0.64
YC1-D	6.5	0.18	14.5	0.37	21.1	0.57
ZMB0	8.0	0.31	15.5	0.71	33.1	1.93
ZMB1-0	11.5	0.34	19.0	0.69	48.55	2.52
ZMB1-1	9.0	0.29	14.5	0.54	50.2	2.84
ZMB2-0	10.0	0.38	18.5	0.71	57.25	3.05
ZMB2-1	8.5	0.22	14.0	0.45	53.0	2.40
ZMB3-0	12.0	0.34	19.5	0.65	58.35	3.08
ZNB0	5.5	0.16	20.5	0.86	40.4	2.10
ZNB1-0	10	0.23	17.0	0.51	48.9	2.83
ZNB1-1	10.0	0.31	12.0	0.43	52.9	3.23
ZNB2-0	10.0	0.23	18.0	0.54	51.2	2.54
ZNB2-1	6.5	0.16	15.5	0.55	51.55	2.54
ZNB3-0	11.5	0.31	17.0	0.55	57.1	2.73

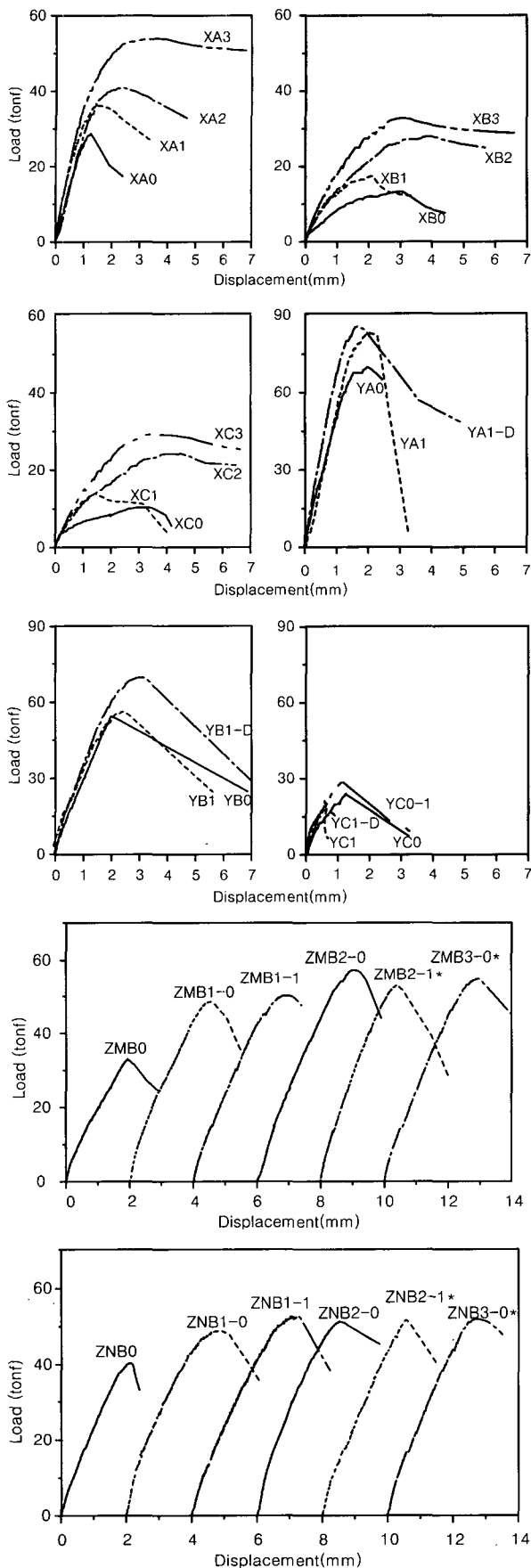


Fig. 4 Load-displacement curve

부의 상단에 가력점이 놓인 XA 계열에서는 반력점 부근의 개구부 모서리 대각 보강근만이 주인장철근에 비해 큰 인장응력을 받는 것으로 나타났고, 나머지 대각근은 모두 압축응력을 받고 있다. 전단경간비가 0.87인 XB 계열 시험체에서 개구부 주변의 보강근 변형률은 개구부의 수직 보강근, 개구부 상단 수평철근, 개구부 하단의 수평철근, 개구부 하단 모서리의 대각보강근 순으로 증가한다. 전단경간비 1.30의 XC 계열 시험체에서는 개구부 하단의 수평 보강근 변형률이 가장 크게 나타났으며, 대각 보강근 중에서는 개구부 상단 모서리의 보강근이 가장 큰 변형률을 보이고 있다.

개구부가 시험체의 중앙에 놓인 Y 계열 시험체에서는, X 계열 시험체와 비교하여 주 압축대가 개구부에 의한 영향을 덜 받게되므로 주인장철근 변형률이 더 크게 나타났다. 전단경간비가 0.43인 YA 계열 시험체에서는 개구부 하부의 수평 보강근 이외에 다른 개구부 보강근의 변형률이 매우 작아 보강 효과가 미미함을 알 수 있다. 전단경간비가 0.87인 YB 계열 시험체 중 가장 큰 파괴하중을 갖는 YB1-D 시험체는 주인장철근의 변형률이 0.002에 가까운 값을 나타내고 있으며, 등간격으로 배치된 복부의 대각 보강근은 초기균열 발생 시점과 복부에 경사균열이 발생하기 직전부터 변형률이 크게 증가하여 종국적으로는 항복 변형률을 넘고 있는 것을 볼 수 있었다.

### 3.3.2 Z 계열 시험체

개구부의 보강에 따른 주인장철근의 변형률은 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 큰 차이를 나타내지 않으나, 개구부 주변 보강근 중 대각 보강근의 변형률은 개구부 상·하단에 경사균열이 발생한 시점을 기준으로 주인장철근의 변형률보다 더 큰 값을 보이고 있어, 대각근이 개구부 주변의 보강근 중 일차적으로 가장 큰 응력을 받고 있는 것으로 나타났다. 개구부가 전단구역의 중앙에 위치한 M 계열 시험체에서 개구부 보강철근의 변형률은 개구부 상부의 수평철근, 반력점 측의 개구부 수직철근, 가력점 측의 개구부 수직철근, 개구부 하단의 수평철근, 개구부 상부 모서리의 대각근, 개구부 하부 모서리의 대각근 순으로 증가하는 것이 관찰되었다. 개구부가 전단구역의 3사분면 즉, 지점부에 위치한 N 계열 시험체에서는, 개구부 보강철근의 변형률이 개구부 측면의 수직철근, 개구부 상단의 수평철근, 개구부 상부 모서리의 대각근 순으로 증가하며, M 계열 시험체에 비해서는 대각근의 변형률이 다소 낮게 측정되었다.

## 4. 실험결과와 비교·분석

### 4.1 개구부의 위치에 따른 영향

X 계열 시험체에서는 Fig. 6(a)에서와 같이 전단경간의

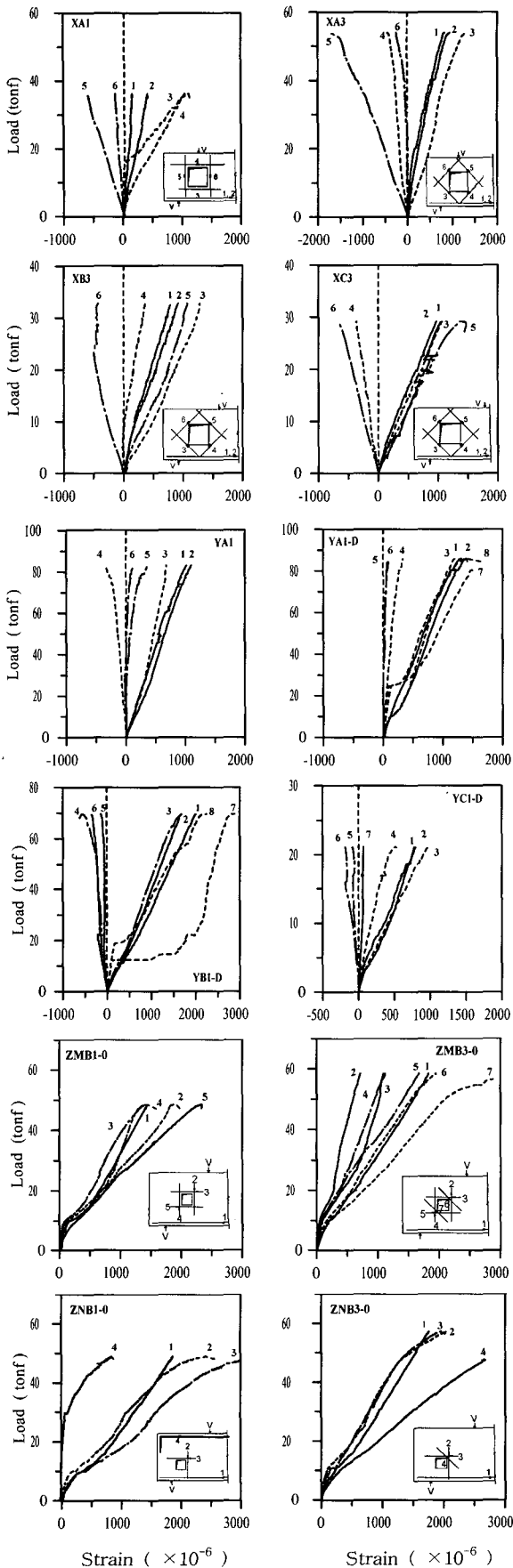


Fig. 5 Load-strain curve

변화에 관계없이 모든 시험체의 주압축하중경로가 개구부의 간섭을 받게되므로 개구부가 없는 시험체의 최대하중에 비해 현저히 낮게 나타났다. 개구부 주변의 보강량이 증가함에 따라 시험체의 최대 하중은 개구부가 없는 시험체의 80~90 퍼센트까지 근접하였으며, 전단경간비가 0.43인 XA 계열 시험체의 경우에는 개구부 모서리의 대각보강근 효율이 높게 나타났고, 전단경간비가 0.87, 1.30인 B, C 계열 시험체의 경우에는 복부에 등간격으로 보강철근을 배치한 시험체의 전단강도가 비교적 높게 측정되었다.

전단경간비가 0.43, 0.87인 YA, YB 계열 시험체는 주압축대가 개구부에 의해 훼손되지 않는 것으로서, 앞서 수행된 개구부가 없는 깊은 보에 관한 연구<sup>2)</sup> 결과와 비교할 때 Fig. 6(b)에서 보이는 것처럼 개구부에 의한 전단 내력의 감소가 전혀 없는 것으로 나타났다. YC 계열 시험체의 경우에는 가력점의 아래에 있는 개구부 상부가 먼저 국부적으로 파괴되었지만, 개구부의 위치를 5 cm 하단으로 조절된 YC0-1 시험체는 개구부가 없는 시험체 최대하중의 92 퍼센트를 나타내어 거의 비슷한 내력을 보였다. 따라서 집중하중을 받는 깊은 보에서 주 압축대가 개구부에 의해 훼손되지 않는 경우에는 개구부로 인한 전단강도의 감소가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 6(c)는 Z 계열 시험체에서의 비교인데, 개구부 주변에 보강철근이 배치되지 않은 경우, 최대하중은 개구부가 지지점 근처에 위치한 N 계열 시험체가 정 중앙에 위치한 M 계열 시험체에 비해 22 퍼센트 정도 크게 측정되었으나, 개구부 주변에 1-D10 이상의 보강철근을 배치한 나머지 시험체에서는 개구부의 위치에 따른 최대하중의 차이를 발견할 수 없었다.

#### 4.2 개구부 주변 철근 보강의 영향

Fig. 6(d)에서와 같이 개구부가 없는 시험체의 최대 하중과 비교할 때, 전단경간비가 0.43인 XA 계열 시험체에서는 개구부 모서리 대각보강철근에 의한 내력의 증가율이 가장 크게 나타났고, 전단경간비가 0.87인 XB 계열 시험체와 전단경간비가 1.30인 XC 계열 시험체는 개구부 주변의 복부영역을 등간격으로 보강한 시험체의 내력 증가율이 상대적으로 크게 나타났다.

Y 계열 시험체에서는 Fig. 6(e)에 나타난 바와 같이 전단경간비가 0.87인 YB 계열 시험체의 복부 대각철근 보강 효율이 큰 것으로 나타나, 복부의 보강철근이 주 압축대와 직각으로 배근될수록 하중지지능력이 향상됨을 알 수 있었다. 그러나 전단경간비가 1.30인 YC 계열 시험체는 개구부 상단이 국부적으로 전단파괴 됨으로 인해 철근보강 효과를 발견하기 어려웠다.

Z 계열 시험체 중 개구부가 전단구역의 중앙에 있는 ZM 계열 시험체에서는 Fig. 6(f)에서와 같이 개구부 주변의 보강이 증가할수록 완만하게 최대 하중도 증가하나, 대

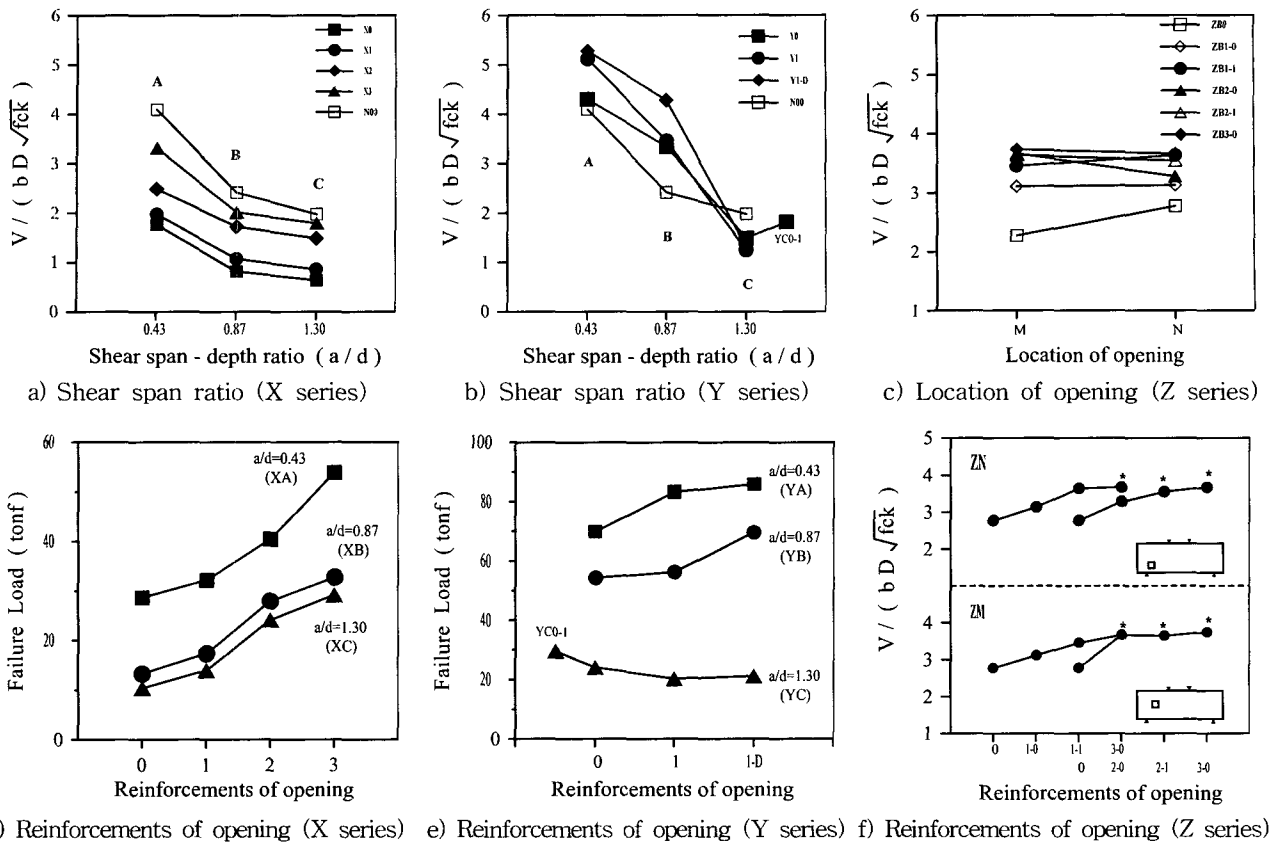


Fig. 6 Comparison of the shear strength according to the various structural parameters

각보강철근이 가장 효과적인 것으로 조사되었으며, 개구부 주변에 직선 철근과 대각철근을 조합하여 보강한 시험체는 개구부가 없는 면에서 파괴되어 개구부가 없는 시험체 이상의 내력을 갖는 것으로 확인되었다. 개구부가 하부의 지지점 측면에 위치한 ZN 계열 시험체 역시 개구부 주변의 보강이 증가할수록 완만하게 최대하중도 증가하며 직선철근으로 보강한 시험체와 대각근으로 보강한 시험체의 내력이 엇비슷하게 나타났고, 조합하여 보강한 시험체는 ZM 계열 시험체와 마찬가지로 개구부가 없는 면에서 파괴되었다. 대각보강근이 배근되지 않은 시험체에서는 개구부 보강근 중 수평철근이, 대각보강근이 배치된 시험체에서는 대각보강 철근이 항복점에 도달한 것으로 조사되었고, 개구부 주변 보강철근은 개구부 상 하단에 경사균열이 발생한 이후 수직철근, 수평철근, 대각 보강철근의 순으로 변형률이 커지는 것이 관찰되어, 개구부 보강철근 중 대각 보강철근의 보강 효율이 가장 큰 것으로 나타났다.

### 4.3 이론식과의 비교

#### 4.3.1 개구부를 갖는 깊은 보의 제안식

개구부를 갖는 깊은 보의 진단강도에 대하여서는 1970년대 후반부터 Ray<sup>3)</sup>, Kong<sup>4)</sup> 등에 의하여 제시되기 시작하였으며, 각각의 제안식에 대한 조건은 Fig. 7 및 8에

보이는 바와 같다.

#### 1) Ray<sup>3)</sup>의 제안식

$$\frac{Q_u}{bD} = 0.1f_c'(\lambda_1)(\lambda_2)(\lambda_3) + 0.0085\psi_s\rho_s f_{s_y} + 0.01\psi_w k_w f_{w_y} \quad (1)$$

여기서,  $\psi_s = 0.65$ ,  $\psi_w = 0.50$

$$\lambda_1 = \left[ 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{k_1 X_n}{k_2 D} \right) \right] \dots \dots \frac{k_1 X_n}{k_2 D} < 1$$

$$\lambda_1 = \frac{2}{3} \dots \dots \frac{k_1 X_n}{k_2 D} \geq 1$$

$\lambda_2 = (1 - m)$  m : 전체 하중경로에 대한 차단된 경로의 비

$$\lambda_3 = \left[ 0.85 \pm 0.3 \left( \frac{e_x}{X_{Ncr}} \right) \right] \left[ 0.85 \pm 0.3 \left( \frac{e_y}{Y_{Ncr}} \right) \right]$$

$$e_x \leq \frac{X_n}{4}, \quad e_y \leq \frac{0.6D}{4}$$

$$X_{Ncr} = (X_n - a_1x), \quad Y_{Ncr} = (0.6D - a_2D)$$

$\rho_s$  : 주인장철근비  $\rho_w$  : 복부 보강근의 철근비

$k_w$  : 보강근의 방향계수로



수평 = 0.85, 수직 =  $\cot \beta$ , 경사 = 1.15

2) Kong<sup>4)</sup>의 제안식

$$Q = C_1 \left[ 1 - 0.35 \frac{k_1 x}{k_2 D} \right] f_t b k_2 D \quad (2)$$

$$+ \sum \lambda C_2 A \frac{y_1}{D} \sin^2 \alpha_1$$

여기서,  $A$  : 주근 및 보강근의 단면적,  $D$  : 보의 깊이,  
 $b$  : 보의 폭,  $f_t$  : 콘크리트의 쪼갬 인장강도  
 $C_1 = 1.4$ ,  $C_2$  : 이형철근 = 3,000 kgf/cm<sup>2</sup>,  
 원형철근 = 1,300 kgf/cm<sup>2</sup>  
 $\lambda$  : 주근 = 1.0, 보강근 = 1.5

4.3.2 제안식과의 비교 분석

Ray<sup>3)</sup> 및 Kong<sup>4)</sup>의 제안식과 실험 결과와의 비교는 Table 5, 및 Fig. 9에 나타나 있는 바와 같다.

Ray의 제안식에 의해 계산된 값은 개구부 상단에서 국부적으로 파괴가 일어난 YC 계열 시험체와 개구부 크기가 다소 커 제안식에서의 제한사항을 초과하는 X 계열 시험체에서 실험값과 많은 차이가 있는 것으로 나타났다, 그러나 개구부가 주 압축대를 차단하고 개구부의 크기가 10 cm × 10 cm인 Z 계열 시험체의 경우 Ray의 이론식은 제안식/실험값의 평균 및 표준편차가 ZM 계열에서 각각 1.00, 0.09 이며, ZN 계열에서는 0.97, 0.06으로 계산되어 실험값에 매우 근접하는 것으로 측정되었다.

Kong의 제안식에 의한 XA0, XB0, XC0 시험체의 이론값이 같게 계산되는 이유는, 개구부가 주 압축대를 차단하는 시험체에서 복부 보강철근이 없을 경우에는 전단경간비의 영향이 고려되지 않기 때문이며, YC0 시험체와

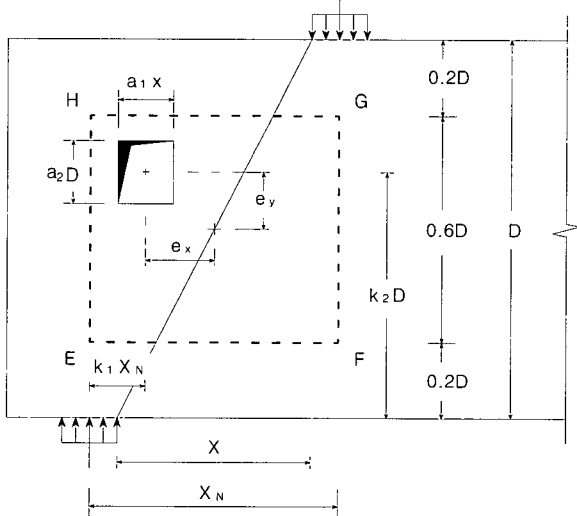


Fig. 7 Typical dimension of Ray's equation

Table 5 Comparison of test results and other proposed equations

Specimens	Exp. results (tonf)	Proposed equation (tonf)			
		Ray	Ray/Exp.	Kong	Kong/Exp.
XA0	28.7	44.4	1.55	14.4	0.50
XA1	36.2	62.0	1.71	24.0	0.66
XA2	40.5	62.0	1.53	29.9	0.74
XA3	53.9	72.9	1.35	49.6	0.92
XB0	13.3	26.7	2.01	14.4	1.08
XB1	17.4	34.8	2.00	20.9	1.20
XB2	28.0	38.0	1.36	27.9	1.00
XB3	32.8	53.4	1.63	48.7	1.48
XC0	10.4	22.3	2.14	14.4	1.38
XC1	13.9	32.7	2.35	20.2	1.45
XC2	24.3	37.6	1.55	27.4	1.13
XC3	29.2	48.8	1.67	49.7	1.70
YA0	69.9	76.9	1.10	74.8	1.07
YA1	83.2	94.5	1.14	89.6	1.08
YA1-D	85.8	104.2	1.21	92.8	1.08
YB0	54.3	53.7	0.99	60.3	1.11
YB1	56.2	61.8	1.10	71.2	1.27
YB1-D	69.6	70.3	1.01	76.0	1.09
YC0	24.1	21.0	0.87	44.7	1.85
YC1	20.2	31.4	1.55	51.2	2.53
YC1-D	21.1	37.6	1.78	57.1	2.71
YC0-1	29.6	18.5	0.63	44.7	1.51
ZMB0	33.1	32.2	0.97	33.4	1.01
ZMB1-0	48.55	52.1	1.07	47.0	0.97
ZMB1-1	50.2*	54.4*	1.08	53.2*	1.06
ZMB2-0	57.25	47.4	0.83	50.5	0.88
ZMB2-1	53.0*	54.4*	1.03	53.2*	0.95
ZMB3-0	58.35*	58.5*	1.00	55.9*	0.96
ZNB0	40.4	36.2	0.90	31.1	0.77
ZNB1-0	48.9	46.6	0.95	40.0	0.82
ZNB1-1	52.9*	54.4*	1.03	53.2*	1.00
ZNB2-0	51.2	46.4	0.91	41.6	0.81
ZNB2-1	51.55*	54.4*	1.06	53.2*	1.03
ZNB3-0	57.1*	54.5	0.95	55.9*	0.98

\* This value is determined by failure of solid web (no opening side)

YC0-1 시험체의 이론값이 같은 것은 개구부가 주 압축대를 차단하지 않는 시험체에서는 개구부의 위치는 고려하지 않고 전단경간비의 영향만 고려하기 때문이다. 그러나 개구부가 주 압축대를 차단하고 개구부의 크기가 10 cm × 10 cm인 Z 계열 시험체에서는 제안식/실험값의 평균 및 표준편차가 ZM 계열에서 각각 0.98, 0.06 이며, ZN 계열에서는 0.90, 0.12로 계산되어 실험값에 근접함을 알 수 있었다. 전반적으로 Ray의 식 및 Kong의 제안식 모두가 실험값에 대해 90 퍼센트 이상의 일치도를 보이나, 그 중에서도 Ray의 제안식에 의한 이론값이 실험값에 좀더 근접하는 것으로 조사되었다.

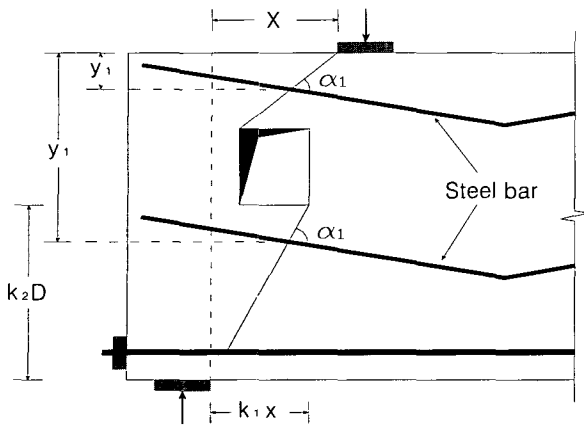


Fig. 8 Typical dimension of Kong's equation

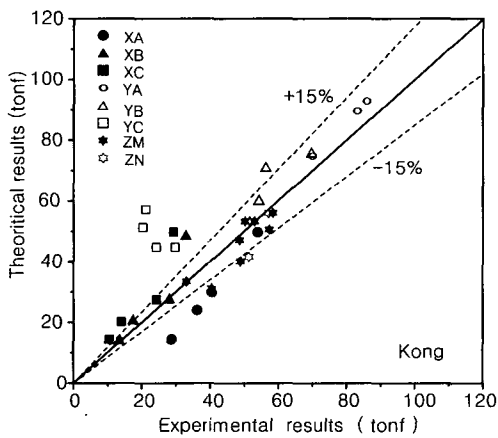


Fig. 9 Comparison of test results and Kong's equation

## 5. 결 론

이 연구는 사각형의 개구부를 갖는 양단이 단순지지된 철근콘크리트 깊은 보를 대상으로 하여, 개구부의 위치, 크기, 개구부 보강 형태 등 여러 구조 변수가 깊은 보의 최대 전단내력, 균열 발생 및 진진, 파괴 형태 등에 미치는 영향을 조사하였고, 기존의 제안식과 비교·분석하였다. 이 연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 주 압축대가 개구부에 의해 훼손되는 시험체는 개구부 상·하단에서 파괴되었고, 주 압축대가 개구부에 의해

훼손되지 않는 시험체는 개구부가 없는 시험체와 유사하게 전단경간 내부에서 콘크리트의 과도한 균열 및 압괴에 의해 파괴되었다.

2) 경사진 복부 보강근이 배근된 시험체는 보강이 없는 시험체에 비해 최고 28 퍼센트까지 극한전단강도가 증가하였으며, 개구부가 있더라도 주 압축대가 개구부에 의해 훼손되지 않으면 개구부의 영향은 무시할 수 있는 것으로 나타났다.

3) 주 압축대가 개구부에 의해 훼손되는 경우에는 개구부 모서리의 보강철근 중 대각철근의 보강효율이 높으며, 직선철근과 대각철근 한가지를 집중적으로 보강하는 것보다는 조합하여 보강하는 것이 극한 전단강도의 증진과 개구부 주변의 균열제어에 유리한 것으로 조사되었다.

4) 제안식과의 비교에서, 개구부의 위치 및 크기가 제안식에 규정된 제한 사항을 넘는 X 계열에서 다소 산포를 보이나, 개구부의 크기가 보 높이의 1/5로서 규정된 제한 사항을 만족하는 Z 계열 시험체에서는 Ray와 Kong의 제안식 모두가 평균 90 퍼센트에서 100 퍼센트의 값을 보여, 개구부가 있는 깊은 보의 극한전단강도를 예측하는 데 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 건설교통부, 1999.
2. 이진섭, 김상식, "집중하중을 받는 철근콘크리트 깊은 보의 전단거동에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회지, Vol. 11, No. 1, 1999. 2., pp.191-200.
3. Ray, S. P. and Reddy, C. S., "Strength of Reinforced Deep Beams with and without Opening in the Web," *The Indian Concrete Journal*, Vol. 53, Sept., 1979, pp.242-246.
4. Kong, F. K. and Sharp, G. R., "Structural Idealization for Deep Beams with Web Openings," *Magazine of concrete Research*, Vol. 29, No. 99, June, 1977, pp.81-91.

## 요 약

깊은 보의 실제 시공에서는 창호, 배관, 설비 등의 건축적 요구 조건과 각종 제약 조건에 의하여 복부에 개구부를 설치해야 하는 경우가 많으며, 이러한 개구부를 갖는 깊은 보에서는 하중 전달 경로가 개구부의 위치와 크기 및 형태 등에 큰 영향을 받게 된다. 이 연구는 양단이 단순지지되어 있는 철근콘크리트 깊은 보를 대상으로 하여, 전단경간비와 콘크리트 강도, 복부 보강 형태 및 개구부의 위치 등 여러 구조 변수가 깊은 보의 최대 전단내력과 균열 발생 및 진진, 파괴형태 등에 미치는 영향을 실험을 통해 조사하고 이론과 비교하였다. 실험 결과, 깊은 보의 거동은 복부의 대각균열 형성과 크게 연관되어 있으며, 전단경간비와 개구부의 영향에 따라 내력이 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이론적으로는 Kong의 제안식과 Ray의 제안식이 비교되었으며 개구부의 크기가 커 다소 오차를 보이는 X 계열 시험체를 제외하면 Kong과 Ray의 제안식 모두가 깊은 보의 극한 전단 강도를 적절히 예측할 수 있는 것으로 조사되었다.

핵심 용어 : 깊은 보, 개구부, 전단-경간비, 복부의 보강, 주 압축대